

Alternativas preliminares de processamento do sorgo biomassa, visando a redução do teor de umidade da massa colhida para obtenção da maior eficiência energética



OBJETIVOS DE
DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL

7 ENERGIA LIMPA
E ACESSÍVEL



Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Milho e Sorgo
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

**BOLETIM DE PESQUISA
E DESENVOLVIMENTO
195**

**Alternativas preliminares de processamento
do sorgo biomassa, visando a redução do
teor de umidade da massa colhida para
obtenção da maior eficiência energética**

Evandro Chartuni Mantovani
Maria Lúcia Ferreira Simeone
Rafael Augusto da Costa Parrella
Antônio Carlos de Oliveira
Marco Aurélio Guerra Pimentel

*Embrapa Milho e Sorgo
Sete Lagoas, MG
2019*

Esta publicação está disponível no endereço:
<https://www.embrapa.br/milho-e-sorgo/publicacoes>

Embrapa Milho e Sorgo

Rod. MG 424 Km 45
Caixa Postal 151
CEP 35701-970 Sete Lagoas, MG
Fone: (31) 3027-1100
Fax: (31) 3027-1188
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

**Comitê Local de Publicações
da Unidade Responsável**

Presidente
Maria Marta Pastina

Secretário-Executivo
Elena Charlotte Landau

Membros
Antonio Claudio da Silva Barros, Cynthia
Maria Borges Damasceno, Maria Lúcia
Ferreira Simeone, Roberto dos Santos
Trindade e Rosângela Lacerda de Castro

Revisão de texto
Antonio Claudio da Silva Barros

Normalização bibliográfica
Rosângela Lacerda de Castro (CRB 6/2749)

Tratamento das ilustrações
Tânia Mara Assunção Barbosa

Projeto gráfico da coleção
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica
Tânia Mara Assunção Barbosa

Foto da capa
Evandro Chartuni Mantovani

1ª edição
Publicação digitalizada (2019)

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Nome da unidade catalogadora

Alternativas preliminares de processamento do sorgo biomassa, visando a
redução do teor de umidade da massa colhida para obtenção da maior
eficiência energética / Evandro Chartuni Mantovani ... [et al.]. – Sete Lagoas :
Embrapa Milho e Sorgo, 2019.
30 p. : il. -- (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Milho e Sorgo,
ISSN 1679-0154; 195).

1. *Sorghum bicolor*. 2. Forragem. 3. Colheita mecânica. 4. Energia térmica. I.
Mantovani, Evandro Chartuni. II. Simeone, Maria Lúcia Ferreira. III. Parrella, Ra-
fael Augusto da Costa. IV. Oliveira, Antônio Carlos de. V. Pimentel, Marco Aurélio
Guerra. VI. Série.

CDD 633.174 (21. ed.)

Sumário

Resumo04

Abstract06

Introdução.....07

Material e Métodos08

Resultados e Discussão18

Conclusões.....29

Agradecimentos.....30

Referências30

Alternativas preliminares de processamento do sorgo biomassa, visando a redução do teor de umidade da massa colhida para obtenção da maior eficiência energética

Evandro Chartuni Mantovani¹

Maria Lúcia Ferreira Simeone²

Rafael Augusto da Costa Parrella³

Antônio Carlos de Oliveira⁴

Marco Aurélio Guerra Pimentel⁵

Resumo – Uma das alternativas mais promissoras para o fornecimento de matéria-prima para queima direta é o sorgo biomassa, com um ciclo curto entre 150 a 180 dias, com a vantagem de ser propagado por sementes e permitir total mecanização de seus processos de produção. O objetivo deste trabalho foi o de avaliar a colheita mecânica com forrageira, para corte da forragem do sorgo biomassa, com 9 mm de comprimento, em diferentes estágios de desenvolvimento de plantas (emborrachamento, florescimento e maturação fisiológica), visando obter o melhor estágio para colheita e redução do teor de umidade da matéria-prima para a queima direta em caldeiras de usinas de cana-de-açúcar. O experimento foi realizado na área experimental da Embrapa Milho e Sorgo, no município de Sete Lagoas, MG, e os tratamentos avaliados foram estabelecidos para estudar o comportamento do sorgo biomassa, na colheita mecânica, em dois espaçamentos, 0,70 e 0,50 m, para uma população inicial de 110.000 plantas.ha⁻¹. A área experimental foi implantada em dois terraços, de 18 metros de largura e 220 m de comprimento, em um Latossolo Vermelho Escuro, em novembro de 2018. Para a colheita mecânica foi utilizada uma forrageira, proveniente de uma parceria da Embrapa com a Empresa JF, que disponibilizou a forrageira JF

¹ Eng.-Agrôn., Ph.D. em Mecanização Agrícola, pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo.

² Química, DSc. em Química, pesquisadora da Embrapa Milho e Sorgo.

³ Eng.-Agrôn., DSc. em Genética e Melhoramento de Plantas, Pesquisador Embrapa Milho e Sorgo.

⁴ Eng.-Agrôn., MSc. em Estatística e Métodos Quantitativos e DSc. Agronomia, Pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo.

⁵ Eng.-Agrôn., DSc em Entomologia, pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo.

1600 AT, com as seguintes características: largura de corte de 1,6 m e rotor com 15 facas. Foram utilizados 12 tratamentos, formados pela combinação de dois espaçamentos entre linhas (0,50 m e 0,70 m), três épocas de colheita (emborrachamento, florescimento e maturação fisiológica) e duas formas de armazenamento (camadas de 0,50 m e 0,20 m de altura) em um delineamento completamente casualizado com cinco repetições. As avaliações de matéria seca e poder calorífico foram realizadas em seis épocas, na colheita, e em intervalos de 7 dias, em cada um dos 12 tratamentos. A análise de variância foi realizada considerando o modelo de parcelas subdivididas no tempo, com tratamentos nas parcelas e épocas de avaliação, nas subparcelas. Comparando-se as médias dos tratamentos, pelo teste de Tukey, verificou-se que os tratamentos 6 (espaçamento entre linhas de 0,70 m, armazenamento em camada de 0,50 m e estágio fenológico: maturação fisiológica) e 12 (espaçamento entre linhas de 0,70 m, armazenamento em camada de 0,20 m e estágio fenológico: maturação fenológica) não diferiram significativamente, entre si, mas se destacaram em relação aos demais tratamentos. Como estes tratamentos são constituídos do mesmo espaçamento entre linhas, 0,70 m, e mesmo estágio fenológico, pode-se inferir que não houve efeito significativo, nessas condições, entre os tipos de armazenamento (camada alta e baixa). Comparando as épocas de avaliação para estes dois tratamentos pode-se verificar, para ambos, que a porcentagem de matéria seca em torno de 80% ocorreu a partir de 21 dias, após a colheita. Para o poder calorífico, os resultados foram similares aos obtidos para matéria seca. Pode-se verificar que os tratamentos 6 e 12, novamente, foram os que se destacaram em relação aos demais.

Termos para indexação: sorgo biomassa, colheita de forragem, energia térmica, armazenamento do colmo, teor de massa seca do colmo, poder calorífico.

Preliminary Alternatives for Biomass Sorghum Processing, Aiming at Reducing the Moisture Content of the Harvested Mass to Obtain the Highest Energy Efficiency

Abstract – One of the most promising alternatives for the supply of raw material for direct burning is biomass sorghum, with a short cycle of 150 to 180 days, with the advantage of being propagated by seeds and allowing full mechanization of their production processes. The objective of this work was to evaluate the mechanical forage harvesting of biomass sorghum, of 9 mm length, in different stages of plant development (boot stage, flowering and physiological maturation), aiming to obtain the best stage for harvesting and reduction of moisture content of the raw material for direct burning in sugar cane mill boilers. The experiment was carried out in the experimental area of Embrapa Milho e Sorgo, in Sete Lagoas, State of Minas Gerais, Brazil, and the evaluated treatments were established to study the behavior of biomass sorghum, in mechanical harvest, in two rows spacings, of 0.70 and 0.50 m for an initial population of 110,000 plants ha⁻¹. The experimental area was set up in two terraces, of 18 meters wide and 220 m long, in a Dark Red Latosol, in November 2018. A forage mechanical harvesting was used from a partnership with the JF Company, which made available the forage Harvester JF 1600 AT, with the following characteristics: cutting width 1.6 m and rotor with 15 knives. Twelve treatments were used, formed by the combination of two row spacings (0.50 m and 0.70 m), three harvest times (boot stage, flowering and physiological maturation) and two storage forms (0.50 m and 0.20 m layer height) in a completely randomized design with five replications. The evaluations of dry matter and calorific value were carried out at 6 seasons, at harvest, and at 7-day intervals, in each of the 12 treatments. The analysis of variance was performed considering the split-plot model, with treatments in the plots and evaluation times in the subplots. Comparing the means of the treatments, by Tukey's test, it was verified that the treatments 6 (line spacing of 0.70 m, high storage and phenological stage, physiological maturation) and 12 (Spacing between 0.70 m lines, 0.20 m layer storage and physiological maturation) did not differ significantly from each other but differed from the other treatments. As these treatments consist of the same row spacing, 0.70 m, and

same phenological stage, it can be inferred that there was no significant effect under these conditions between the storage types (upper and lower layer). Comparing the evaluation times for these two treatments it can be verified for both that the dry matter content around 80% occurred from 21 days after the harvest. For the calorific value the results were similar to those obtained for dry matter. It can be verified that the treatments 6 and 12 again were the ones that stood out in relation to the others.

Index terms: biomass sorghum, forage harvest, thermal energy, stem storage, stem dry mass content, high calorific power.

Introdução

A demanda por biomassa para a queima direta em caldeiras tem sido crescente, e o interesse por biomassa, de resíduos de origem vegetal, é perfeitamente viável para atendimento de demandas específicas de energia (Samson et al., 2005).

Atualmente, uma das alternativas mais promissoras para o fornecimento de matéria-prima para queima direta é o sorgo biomassa, com um ciclo curto entre 150 a 180 dias, com a vantagem de ser propagado por sementes e permitir total mecanização de seus processos de produção.

Para tanto, é necessário gerar informações demandadas pela cadeia energética, para um sistema de produção de sorgo biomassa completo, capaz de determinar o manejo mais adequado da colheita mecânica, em diferentes ambientes de cultivo, visando fornecer matéria-prima de alta qualidade para suprir a demanda energética do País.

Existe dificuldade para a redução do teor de umidade do colmo para a queima em caldeiras, através do melhoramento genético, para valores demandados abaixo de 50% de umidade. A colheita mecânica realizada por forrageiras pode contribuir para solucionar este problema.

Além disso, há uma ausência de informações acerca da colheita mecânica da cultura do sorgo biomassa, visando produzir matéria-prima com qualidade e mais seca, para a queima direta em caldeiras de alta pressão.

Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a colheita mecânica com forrageira, para corte da forragem do sorgo biomassa, com 9 mm de comprimento, em diferentes estágios de desenvolvimento de plantas (emborrachamento, florescimento e maturação fisiológica), visando obter o melhor estágio para colheita e redução do teor de umidade da matéria-prima para a queima direta em caldeiras de usinas de cana-de-açúcar.

Este trabalho visa estudar as melhores opções para a queima de biomassa na produção de energia térmica, pois os resultados apresentados pela cultivar BRS716 são bastante eficientes na produção de matéria verde, em um ciclo curto de 150-180 dias, com valores variando de 89 a 113 t.ha⁻¹. Além de contribuir para a produção de grande quantidade de matéria seca, para as usinas de cana-de-açúcar, no seu período de descanso, permite também economizar energia elétrica, com a produção de energia limpa. Produção e queima de biomassa para geração de energia térmica atendem ao ODS7, por aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética. Os estudos até então apresentados mostram que a forragem de sorgo biomassa colhida e armazenada no chão, com e sem revolvimento da massa de sorgo, a partir dos 14 dias, atinge o teor de matéria seca de 50% e poder calorífico de 10.000 J.g⁻¹, valores estes superiores à tradicional queima de cana-de-açúcar, que apresenta matéria seca de 50% e poder calorífico de 7.162 J.g⁻¹ (Burin et al., 2015), pela perda de extrativos durante o processo de prensagem para retirada do caldo. Para tanto, é necessário gerar informações demandadas pela cadeia energética, para um sistema de produção de sorgo biomassa completo, capaz de determinar o manejo mais adequado da colheita mecânica, em diferentes ambientes de cultivo, visando fornecer matéria-prima de alta qualidade para suprir a demanda energética do País.”

Material e Métodos

O experimento foi realizado na área experimental da Embrapa Milho e Sorgo, no Município de Sete Lagoas, MG, a 19°27'57"S, 44°14'49"W e a 767 m de altitude. A região apresenta clima tropical chuvoso, do tipo Aw, de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, com média anual em torno de 23 °C e média máxima de 28 °C. O período chuvoso vai de outubro a março, com índice pluviométrico médio anual de 1.403 mm.

Os tratamentos avaliados foram estabelecidos para estudar o comportamento do sorgo biomassa, na colheita mecânica, em dois espaçamentos, 0,70 e 0,50 m, para uma população inicial de 110.000 plantas. ha⁻¹. A área experimental foi implantada em dois terraços, de 18 metros de largura e 220 m de comprimento, em um Latossolo Vermelho escuro, em novembro de 2018.

A área experimental, com 0,50 m de espaçamento entre linhas, foi semeada na data de 19/11/2018, com uma semeadora-adubadora Massey Ferguson, modelo MF508H, distribuindo sete sementes por metro linear e com uma adubação de 400 kg do fertilizante NPK 08-28-16 + B. Da mesma forma, a de 0,70 m de espaçamento entre linhas foi semeada na data de 27/11/2018, com uma semeadora-adubadora Marchesan, modelo Flex Suprema, distribuindo nove sementes por metro linear e com uma adubação de 400 kg do fertilizante NPK 08-28-16 + B.

Foram realizadas duas adubações de cobertura, sendo a primeira com 4 a 5 folhas, utilizando-se o fertilizante NPK 20-00-20, na dosagem de 400 kg, por meio de um adubador tratorizado. A segunda, com o estágio de desenvolvimento de 7 a 8 folhas, utilizando-se o fertilizante sulfato de amônia, na dosagem de 150 kg.ha⁻¹, adicionando ureia, 100 kg.ha⁻¹, na dosagem de 250 kg.ha⁻¹, conforme Tabela 1.

Tabela 1. Adubação de cobertura, realizada na área experimental, nas respectivas datas e espaçamentos, com as dosagens.

Adubação de Cobertura	1ª aplicação	2ª aplicação
Espaçamento 0,70	07/12/2018	20/12/2018
Espaçamento 0,50	19/12/2018	02/01/2019
Dosagem	400 kg ha ⁻¹	250 kg ha ⁻¹
Fertilizante	20-00-20	Sulfato de amônia (15. ha ⁻¹ kg. ha ⁻¹) + Ureia (100 kg.ha ⁻¹)

O controle de plantas daninhas foi realizado por meio da aplicação do herbicida Atrazina, na dose de 3 litros.ha⁻¹, nas duas áreas, com duas semanas após o primeiro plantio.

Para controle de insetos, foi utilizado o controle biológico, aplicando os inimigos naturais *Trichogramma* spp, em torno de 80%, e *Telenomus remus*, em torno de 20%, duas vezes por semana, durante todo o ciclo de crescimento.

Para a colheita mecânica foi utilizada uma máquina forrageira, proveniente de uma parceria entre a Embrapa e a Empresa JF, que disponibilizou a forrageira JF 1600 AT, com as seguintes características: largura de corte de 1,6 m; rotor com 15 facas; braço de acoplamento com articulação total e duas rodas de apoio; um sistema de transmissão sem correia; capacidade de 50 t.h⁻¹; demanda de trator de potência variando de 80 a 140 cv e com possibilidade de regulagem do material picado de 2,5 a 43 mm (Figura 1).

Com uma largura de corte de 1,60 m, a área, com espaçamento de 0,70 m, duas linhas foram colhidas, percorrendo uma distância de 177,7 m e 117,14 m, na área com espaçamento de 0,50 m. Considerando a área 1 colhida, de 248,78 m², a produtividade do campo foi de 109,7 t.ha⁻¹, e na área 2, de 175,95 m², com 149,28 t.ha⁻¹.

A colheita mecânica, com a máquina forrageira, foi planejada para ser realizada em três períodos fenológicos (épocas de colheita) do sorgo biomassa para avaliação do teor de umidade e definição da melhor época e do maior teor de matéria seca.

Colheita 1: Emborrachamento das folhas-19/03/2019

Para calcular a produtividade do sorgo biomassa, do campo colhido, o procedimento utilizado foi o de colher a forragem até encher uma carreta, em cada área de testes. Em seguida, realizou-se a pesagem do material e mediu-se a área colhida. Este valor de produtividade (t.ha⁻¹) foi corrigido posteriormente, para cada um dos três testes, para se conhecer o Peso de Massa Seca (PMS). Os procedimentos realizados para exemplificar a colheita da forragem estão apresentados na Figura 1.

Fotos: Evandro Chartuni Mantovani, 2019



Figura 1 (A, B, C e D). Vista geral da Colheita 1, mostrando o procedimento de encher a carreta e em seguida, com a pesagem do material colhido.

Colheita 2: Florescimento – 23/04/2019

Na fase de florescimento da cultura, a segunda colheita foi processada, conforme o planejado, e a metodologia utilizada para os testes de campo e amostragens seguiram os mesmos procedimentos da primeira colheita.

É importante notar, na Figura 2, que o colmo já está mais maduro e as folhas de baixo, de coloração marrom, um pouco mais secas. Mesmo assim, durante a colheita, a forrageira não apresentou diferença em relação à primeira, na fase de emborrachamento.

Fotos: Evandro Chartuni Mantovani, 2019



Figura 2 (A, B e C). Vista da colheita 2, indicando fase de florescimento da cultura, a colheita da forragem e a área colhida, ao longo do campo.

Colheita 3: Maturação Fisiológica – 22/05/2019

Ao atingir a maturação fisiológica dos grãos, a terceira colheita foi realizada para avaliar se o teor de umidade do colmo atingiu o nível recomendado para queima, como mostram as fotos da Figura 3.

Para os testes de campo, a forrageira JF 1600 AT foi acoplada ao trator Agrale, modelo BX 6110, de 105 cv, com embreagem dupla, e a colheita foi realizada na área experimental, nos dois espaçamentos entre linhas, com uma regulagem de corte do material picado de 9 mm.

Fotos: Evandro Chartuni Mantovani, 2019



Figura 3 (A, B e C). Vista da colheita 3, indicando a fase de maturação fisiológica dos grãos, plantas mais secas e máquina forrageira ao fundo, recolhendo a biomassa.

Foram utilizados 12 tratamentos (Tabela 2), formados pela combinação de dois espaçamentos entre linhas (0,50 m e 0,70 m), três épocas de colheita (emborrachamento, florescimento e maturação fisiológica) e duas formas de armazenamento (camadas de 0,50 m e 0,20 m de altura) em um delineamento completamente casualizado com cinco repetições. As avaliações de matéria seca e poder calorífico foram realizadas em seis épocas, na colheita, e em intervalos de 7 dias, em cada um dos 12 tratamentos. A análise de variância foi realizada considerando o modelo de parcelas subdivididas no tempo, com tratamentos nas parcelas e épocas de avaliação, nas subparcelas.

Tabela 2. Organização dos tratamentos para análise de variância do experimento de colheita do sorgo biomassa utilizando uma máquina forrageira.

Tratamento	Espaçamento ¹	Tipo de armazenamento ²	Estágio fenológico ³
1	1	1	1
2	1	1	2
3	1	1	3
4	2	1	1
5	2	1	2
6	2	1	3
7	1	2	1
8	1	2	2
9	1	2	3
10	2	2	1
11	2	2	2
12	2	2	3

¹Espaçamento: 1= 0,50 m; 2= 0,70m.

²Tipo de armazenamento: 1= camada alta (0,50 m); 2= camada baixa (0,20 m).

³Estágio fenológico: 1= emborrachamento; 2= florescimento; 3= maturação fisiológica.

Para a caracterização do sorgo biomassa na área experimental, as seguintes medidas foram tomadas da cultura:

- Estande final, (número de plantas. ha⁻¹)
- Altura de planta, (m)
- Acamamento e quebra de plantas, em porcentagem (%)
- Durante a colheita mecânica, os seguintes procedimentos foram realizados:
- Pesagem do trator + carreta forrageira vazia
- Pesagem do trator + carreta cheia
- Medição da área colhida, (m²)

Do material colhido na carreta forrageira, foram retiradas cinco subamostras, de 1 kg cada, em diferentes locais, para análise em laboratório.

A forragem colhida na carreta foi depositada em um pátio e armazenada ao ar livre, simulando o procedimento das usinas, para acompanhar a taxa de umidade ao longo do tempo, em duas camadas, uma alta (0,50 m) e uma baixa (0,20 m). (Figura 4).

Fotos: Evandro Chartuni Mantovani, 2019



Figura 4 (A e B). Foto do conjunto trator + forrageira, com detalhe da forrageira colhendo e do material colhido, sendo descarregado no pátio.

Como mencionado anteriormente, as amostras da forragem depositada no pátio, ao ar livre, foram coletadas, na primeira semana e depois nas semanas subsequentes, até completar um mês, quando coincidia com o outro período de colheita. Desta maneira, o teor de matéria seca e poder calorífico superior serão avaliados em uma análise de variância, para todas as três colheitas, nos períodos de emborrachamento (colheita 1), florescimento (colheita 2) e maturação fisiológica (colheita 3).

Adicionalmente ao processo de secagem do material colhido e acondicionamento em pilhas no campo, foi conduzido ensaio com material obtido da colheita de sorgo biomassa no estágio de maturação fisiológica, realizando revolvimento das pilhas, com objetivo de verificar a dinâmica de secagem em relação ao material acondicionado a campo. Foram utilizados os mesmos tratamentos do ensaio original (Tabela 2) diferindo-se apenas em relação ao tipo de colheita, sendo utilizada a máquina forrageira acoplada ao trator e uma colheita de plantas manual seguida de desintegração do material utilizando-se um picador estacionário de forragens Nogueira, modelo EM-

6400. A máquina forrageira fornecia partículas de tamanho médio de 9 mm, enquanto o picador de forragens tamanho médio de 14 mm. Assim, pôde-se verificar se o tamanho de partículas teria influência no processo de secagem do material. Dessa forma, foi utilizado um delineamento inteiramente casualizado com dois espaçamentos de plantio (0,50 e 0,70 m), dois tipos de máquinas (forrageira e picador de forragens) e três repetições.

Foto: Evandro Chartuni Mantovani, 2019



Figura 5. Forragem colhida pela forrageira e depositada no pátio, para acompanhamento a taxa de umidade, ao longo do tempo.

Cada pilha de material colhido tinha, em média, 36,8 kg, e foi depositada em local coberto logo após a colheita e o processamento, sendo revolvida diariamente de forma manual (Figura 6). Em cada pilha foi coletada uma subamostra para determinação da matéria seca a 65 °C, do dia da colheita (tempo zero) até a secagem do material (abaixo de 20% de conteúdo de água). Os dados de percentual de matéria seca foram submetidos à análise de variância, considerando o modelo de parcelas subdivididas no tempo. Após análise de variância foi realizada análise de regressão considerando percentual de matéria seca e tempo de armazenamento, em dias.

Fotos: Marco Aurélio Guerra Pimentel, 2019.



Figura 6 (A e B). Pilhas de forragem de sorgo biomassa depositadas em local coberto e revolvidas diariamente, para determinação da matéria seca, ao longo do tempo.

Análises físico-químicas do material colhido

Determinação da matéria seca a 65 °C

As amostras de material vegetal obtidas no processamento realizado no item anterior foram pesadas em balança semianalítica e secas em estufa de circulação de ar forçada a 65 °C, até peso constante.

Determinação do poder calorífico superior

As análises do poder calorífico foram realizadas de acordo com a norma NBR 11956/90 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1990), em uma bomba calorimétrica marca Ika, modelo C2000. O calorímetro foi previamente calibrado utilizando pastilhas de ácido benzoico, com poder calorífico de $26,45 \text{ kJ.kg}^{-1}$. Para a realização da análise, utilizou-se aproximadamente 1,0 g de amostra do material vegetal fresco. As amostras foram previamente transformadas em pastilhas utilizando uma prensa manual (Figura 4). As análises foram realizadas após 30 minutos de estabilização do equipamento. Durante as análises foi observado que algumas amostras não sofriam combustão total, face a grande umidade do material. Em seguida o material foi seco a 65°C em estufa até peso constante, e novamente foi realizada a determinação do poder calorífico (Figura 7).

Foto: Evandro Chartuni Mantovani, 2019



Figura 7 (A e B). Calorímetro e pastilhas de amostras de sorgo para análise de poder calorífico superior.

Resultados e Discussão

A avaliação do estande inicial da área experimental foi realizada no dia 21/12/2018, contando todas as plantas, em 10 metros de comprimento, em cada um dos dois espaçamentos (0,50 e 0,70 m), com seis repetições, sendo os dados apresentados a seguir (Figuras 8 e 9).

A regulagem da semeadora durante o semeio foi feita para um planejamento de estande inicial de 110 mil plantas.ha⁻¹, em uma área de plantio direto, com pouca palha, sendo que o estande final foi de 96.476 plantas.ha⁻¹, na área 1 com espaçamento de 0,70 m, e na área 2, com 92.333 plantas.ha⁻¹, no espaçamento de 0,50 m, indicando um campo de testes adequado para os objetivos do trabalho. Este cuidado tem que ser maior ainda, como informa Mantovani e May (2015) para as semeaduras que normalmente ocorrem em áreas de reforma de canaviais, sobre alta densidade de palhada de cana. A semeadura nestas condições demanda uma atenção especial, porque a maioria das semeadoras desenvolvidas para semeadura direta em palhada de soja, trigo ou milho não consegue uma semeadura adequada com baixa emergência de plantas, principalmente pelo excesso de palha e pela profundidade da semente.

Para a realização dos testes com a forrageira, a cultura do sorgo biomassa foi acompanhada ao longo do tempo e com os devidos cuidados que demandam, como o controle fitossanitário e água, através de um sistema de irrigação.

Na previsão dos três testes, a primeira colheita com a forrageira JF 1600 AT, o ponto de referência da planta foi o período de emborrachamento das folhas, o que aconteceu na terceira semana do mês de abril, conforme os dados da cultivar plantada. Para tanto, uma caracterização agrônômica do campo foi realizada, como apresentado na Tabela 3, para se conhecer o estande final, altura de planta, diâmetro do colmo, peso de matéria verde (PMV) e peso de matéria seca (PMS).

É importante observar que o perfilhamento das plantas compensou a redução no estande inicial, com valores do número de plantas, quase o dobro do inicial. Além disso, a cultivar se mostrou bem eficiente na produção de matéria verde, com valores variando de 89 a 113 t.ha⁻¹, como mostra Figura 8.

Tabela 3. Dados agronômicos da área experimental, com sorgo biomassa, BRS 716, antes do início da colheita com a Forrageira JF 1600 AT, nos dois terraços, com dois espaçamentos entre linhas. 14/03/2019, Embrapa Milho e Sorgo*.

Sorgo Biomassa BRS716	Espaçam.	Trat.	Rep.	Estande Final (plantas/hectare)	PMV (t/ha)	PMS (t/ha)
Faixa 1 - Espaçamento de plantio= 0,50 m	1	2	R1	176.000	107.800	23.662
	1	2	R2	176.000	114.600	25.155
	1	2	R3	152.000	111.000	24.365
	Média			168.000	111.333	24.394
Faixa 2 - Espaçamento de plantio 0,70 m	2	2	R1	197.143	130.429	28.629
	2	2	R2	182.857	109.714	24.082
	2	2	R3	174.286	100.829	22.132
	Média			184.762	113.657	29.948

PMV= peso do material verde

PMS= peso do material seco

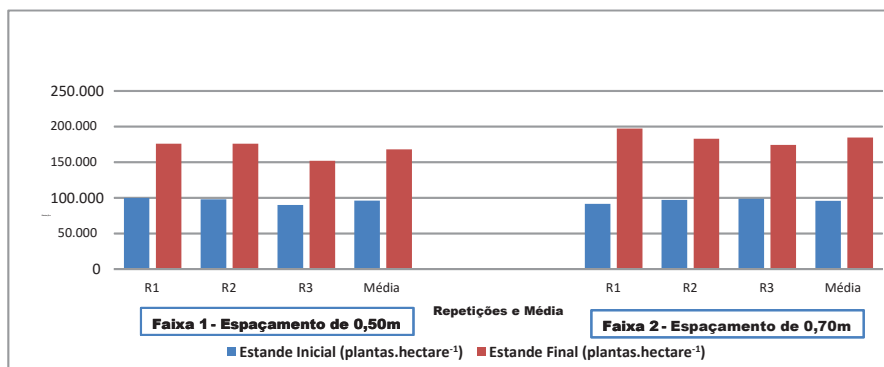


Figura 8. Estande inicial e final do sorgo biomassa – BRS 716, da área experimental de testes. Embrapa Milho e Sorgo, 2019.

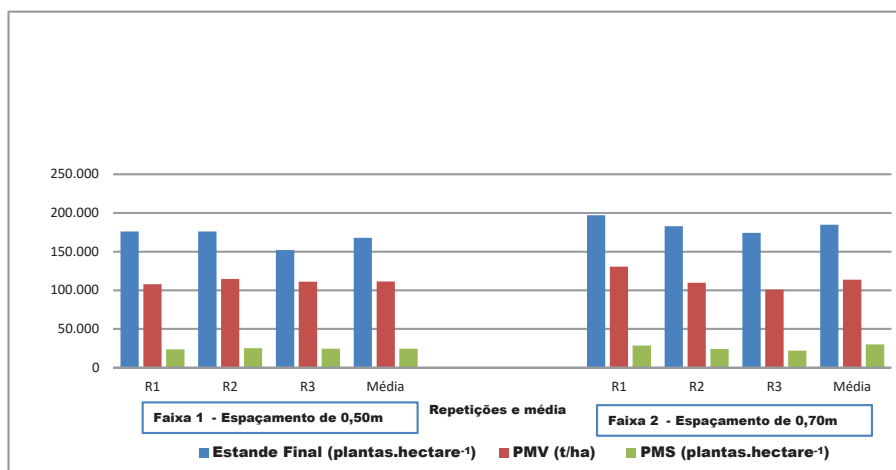


Figura 9. Resultados do estande final, PMV e PMS do sorgo biomassa – BRS 716, da área experimental de testes. Embrapa Milho e Sorgo, 2019.

Como mencionado anteriormente, as amostras da forragem depositadas no pátio, ao ar livre, foram coletadas, na primeira semana e depois semanalmente, nas semanas subsequentes, até completar um mês, quando coincidia com o outro período de colheita. Desta maneira, os resultados da análise de variância para o teor de matéria seca e poder calorífico de todas as três colheitas, nos períodos de emborrachamento (colheita 1), florescimento (colheita 2) e maturação fisiológica (colheita 3), são apresentados a seguir, indicando teor de matéria seca (Tabela 4) e poder calorífico superior (Tabela 6).

O resultado da análise de variância está apresentado na Tabela 4. Constatou-se que houve diferença significativa entre os tratamentos (TRAT), época de avaliação (EPAVAL) e a interação, tratamentos com época de avaliação.

Tabela 4. Análise de variância para o teor de matéria seca do sorgo biomassa em diferentes combinações de tratamentos (espaçamento, épocas de colheita e tipo de armazenamento).

Tabela de Análise de Variância					
FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	11	47169,68	4288,15	332,21	0,0000
erro 1	48	619,57	12,90		
EPAVAL	5	43186,87	8637,37	616,42	0,0000
TRAT*EPAVAL	55	15893,80	288,97	20,62	0,0000
erro 2	240	3362,885	14,01		
Total corrigido	359	110232,82			
CV 1 (%) = 7,88					
CV 2 (%) = 8,21					
Média geral: 45,59 Número de observações: 360					

¹Espaçamento: 1= 0,50 m; 2= 0,70 m.

²Tipo de armazenamento: 1= camada alta (0,50 m); 2= camada baixa (0,20 m).

³Estágio fenológico: 1= emborrachamento; 2= florescimento; 3= maturação fisiológica

Comparando-se as médias dos tratamentos, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância (Tabela 5), verificou-se que os tratamentos 6 (Espaçamento entre linhas de 0,70 m, armazenamento 0,50 m e estágio fenológico, maturação fisiológica) e 12 (Espaçamento entre linhas de 0,7 m, armazenamento em camada de 0,20 m e maturação fenológica) não diferiram significativamente, entre si, mas se destacaram dos demais. Como estes tratamentos são constituídos do mesmo espaçamento entre linhas, 0,70m, e mesmo estágio fenológico, pode-se inferir que não houve efeito significativo, nessas condições, entre os tipos de armazenamento (camada 0,50 m e 0,20 m).

Tabela 5. Teor médio de matéria seca (%) de sorgo biomassa para diferentes combinações de espaçamento, tipo de armazenamento e estágio fenológico da planta.

Tratamentos	Matéria Seca (%)
7	29,78 a
1	29,92 a
2	32,05 a
8	32,75 a
3	45,11 b
5	46,90 bc
9	48,61 c
11	49,06 c
4	53,05 d
10	55,37 d
12	61,48 e
6	62,97 e

Tratamentos:

Espaçamento: 1= 0,50 m; 2= 0,70m

Tipo de armazenamento: 1= camada alta (0,50 m); 2= camada baixa (0,20 m).

Estágio fenológico: 1= emborrachamento; 2= florescimento; 3= maturação fisiológica

Combinações de tratamentos: 1(1,1,1); 2(1,1,2); 3(1,1,3); 4(2,1,1); 5(2,1,2); 6(2,1,3); 7(1,2,1); 8 (1,2,2); 9(1,2,3); 10(2,2,1); 11(2,2,2); 12(2,2,3)

Médias seguidas de mesma letra não se diferem, significativamente, ao nível de 5% de probabilidade.

Comparando as épocas de avaliação para estes dois tratamentos pode-se verificar para ambos que a porcentagem de matéria seca em torno de 80% ocorreu a partir de 21 dias, após a colheita, conforme pode-se observar na Figura 10.

Podemos observar também que o armazenamento 2 obteve o maior teor de matéria seca do experimento, atingindo 88,62% (0,50 m) e 87,72% (0,70 m) aos 35 dias.

Nas Figuras 10 e 11 pode-se observar que o teor de matéria seca atinge aproximadamente, 80%, em um período de 21 dias, tanto para o tratamento 6, quanto para o tratamento 12, sob as condições analisadas.

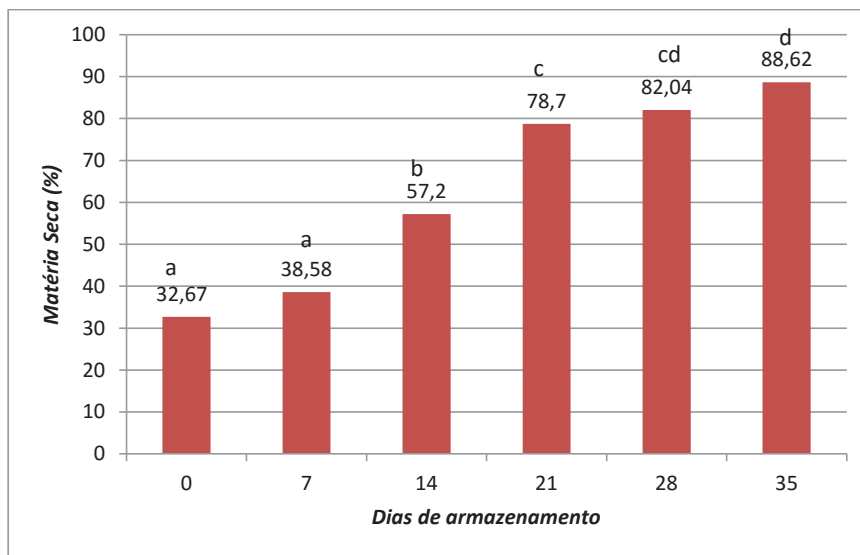


Figura 10. Resultado do Tratamento 6, para teor de matéria seca (%) do sorgo biomassa armazenado por 35 dias, após a colheita.

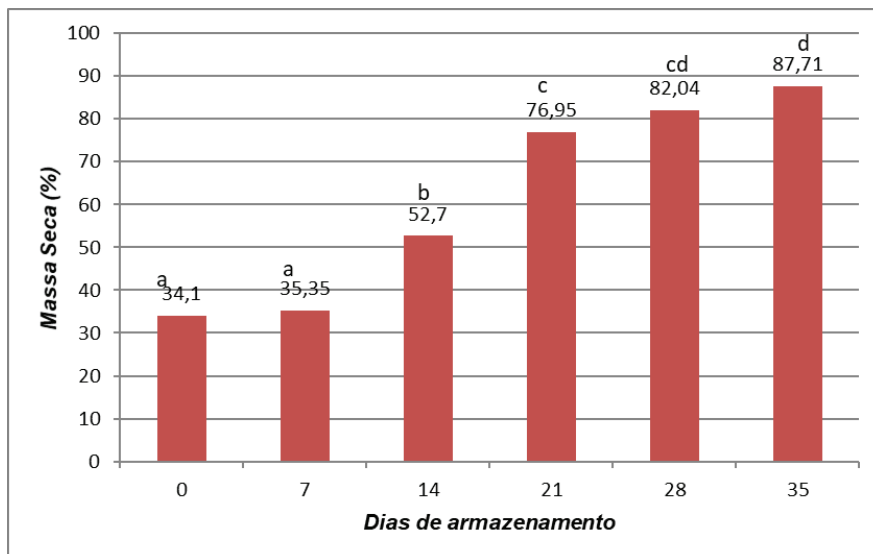


Figura 11. Resultado do Tratamento 12, para teor de matéria seca (%) do colmo armazenado por 35 dias, após a colheita.

O ensaio conduzido com pilhas de sorgo biomassa que foram revolvidas periodicamente apresentou teor de matéria seca inicial, logo após a colheita, de 32,4% em média (Figura 12). Após 12 dias de secagem o teor de matéria seca do material atingiu 51,5% (Figura 12), teor considerado aceitável para queima em caldeira, dado que corrobora os valores apresentados na Figura 10. Ao final de 32 dias de secagem em local coberto e com revolvimento periódico o teor de matéria seca final foi de 82,3% (Figura 12).

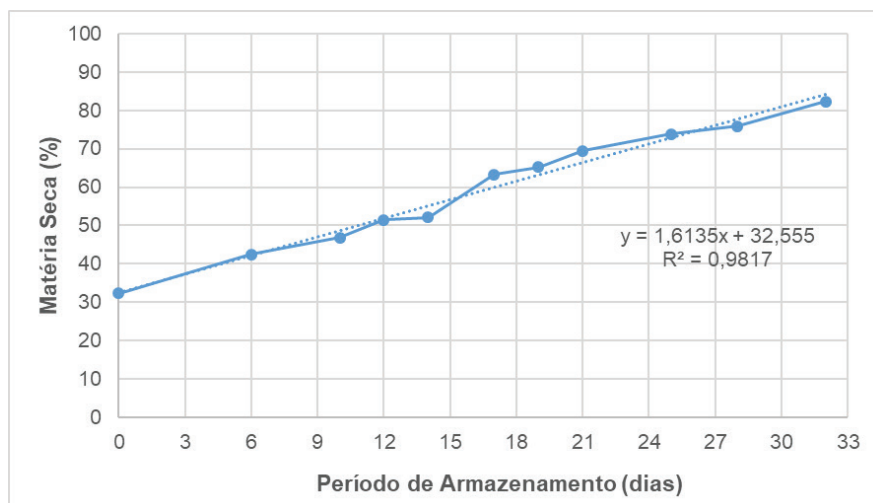


Figura 12. Teor de matéria seca (%) de ensaio com pilhas de sorgo revolvidas manualmente no período após a colheita até 32 dias de secagem em terreiro coberto.

Para o poder calorífico os resultados foram similares aos obtidos para matéria seca. Pode-se verificar pela análise de variância apresentada na Tabela 6 e resultado do teste de comparação das médias (Tabela 7) que os tratamentos 6 e 12, novamente, foram os que se destacaram em relação aos demais.

Tabela 6. Análise de variância para poder calorífico do sorgo biomassa em diferentes combinações de tratamentos (espaçamento, épocas de colheita e tipo de armazenamento).

Tabela de Análise de Variância					
FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	11	1,81E+0009	165042152,00	269,67	0,0000
erro 1	48	29376155,73	612003,24		
EPAVAL	5	2,97E+0009	594308223,69	881,14	0,0000
TRAT*EPAVAL	55	906731071,40	16486019, 48	24,44	0,0000
erro 2	240	161874010,26	674475, 04		
Total corrigido	359	5,88E+0009			
CV 1 (%) = 8.01					
CV 2 (%) = 8.41					
Média geral:	9766,49	Número de observações:		360	

Tabela 7. Poder calorífico (J.g⁻¹) em média para o sorgo biomassa em diferentes combinações de espaçamento, tipo de armazenamento e estágio fenológico da planta.

Tratamentos	Poder Calorífico (J.g ⁻¹)
7	6.123,8 a
1	6.410,6 a
2	6.459,5 a
8	8.496,4 b
10	9.781,2 c
3	10.323,7 cd
4	10.797,2 de
9	10.865,6 de
5	11.177,2 e
11	11.956,8 f
12	12.115,6 fg
6	12.690,1 fg

Tratamentos: Espaçamento: 1= 0,50 m; 2= 0,70m

Tipo de armazenamento: 1= camada alta (0,50 m); 2= camada baixa (0,20 m).

Estágio fenológico: 1= emborrachamento; 2= florescimento; 3= maturação fisiológica

Combinações de tratamentos: 1(1,1,1); 2(1,1,2); 3(1,1,3); 4(2,1,1); 5(2,1,2); 6(2,1,3); 7(1,2,1); 8 (1,2,2); 9(1,2,3); 10(2,2,1); 11(2,2,2); 12(2,2,3)

Médias seguidas de mesma letra não se diferem, significativamente, ao nível de 5% de probabilidade.

A partir dos 14 dias, a forragem atingiu o teor de matéria seca de 50% (Figuras 10 e 11), e poder calorífico de 10.000 J.g^{-1} (Figuras 13 e 14) um índice aceitável para queima em caldeira. Esse resultado está acima da referência que é o bagaço de cana, que apresenta matéria seca de 50% e poder calorífico de 7.162 J.g^{-1} (Burin et al., 2015). No caso do bagaço de cana, o poder calorífico é inferior, em razão da perda de extrativos durante o processo de prensagem para retirada do caldo. No caso do sorgo biomassa, a forragem não passa pelo processo de prensagem e, portanto, apresenta poder calorífico maior.

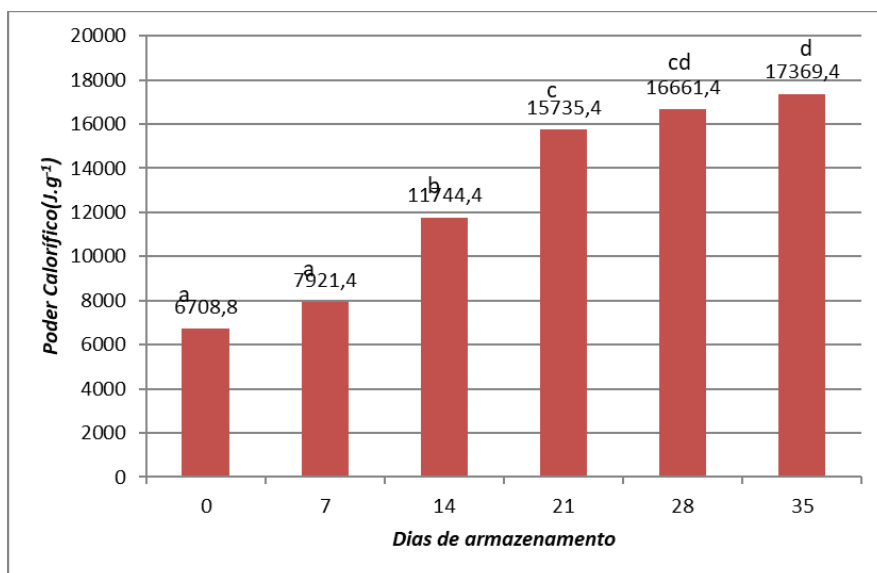


Figura 13. Resultado do Tratamento 6, para poder calorífico (J.g^{-1}) do colmo armazenado por 35 dias, após a colheita.

Além disso, o período ideal para a colheita do sorgo biomassa deverá ocorrer durante a maturação fisiológica do grão, quando a forragem poderá atingir valores máximo de poder calorífico, 17.369 J.g^{-1} (equivalente a 4.145 cal.g^{-1}). Nos tratamentos 6 e 12 é importante ressaltar que não houve diferença significativa entre os períodos de armazenamento de 28 e 35 dias.

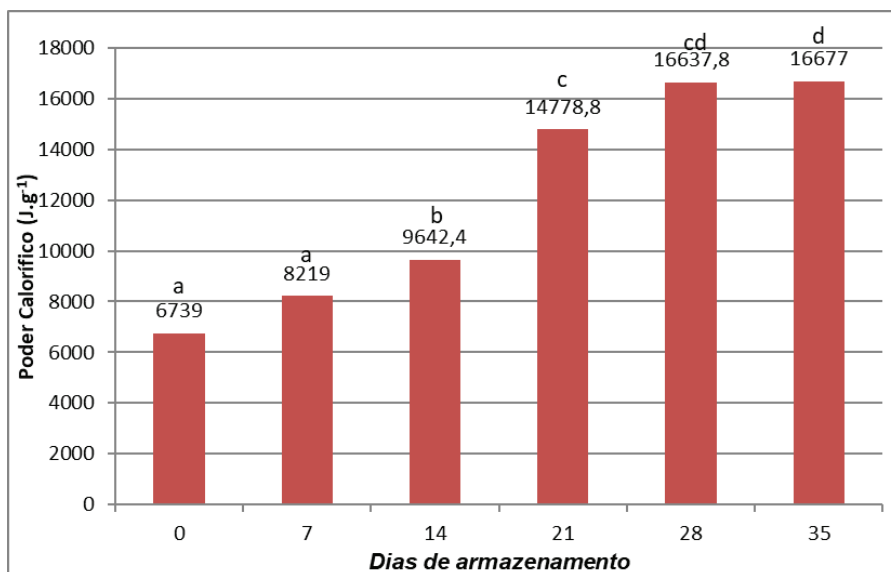


Figura 14. Resultado do Tratamento 12, para poder calorífico (J.g^{-1}) do colmo armazenado por 35 dias, após a colheita.

Conclusões

A melhor época de colheita ocorreu na maturação fisiológica, quando a forragem ficou armazenada por 21 dias, no pátio, com valores de matéria seca de 80% e poder calorífico de até 16.000 J.g^{-1} .

O teor de matéria seca qualifica a biomassa para ser queimada aos 14 dias, após a colheita, com 50% de umidade e 10.000 J.g^{-1} , de poder calorífico, em ambos os ensaios, com e sem revolvimento da massa de sorgo.

Os valores máximos de poder calorífico foram alcançados a partir de 21 dias de armazenamento da forragem, quando a matéria seca atingiu valores próximos de 80%.

Após 35 dias da colheita na maturação fisiológica, o sorgo biomassa apresentou 87,71% de matéria seca e poder calorífico de 17369 J.g⁻¹.

Os valores alcançados para o sorgo biomassa estão 30% acima dos valores de referência do poder calorífico para o bagaço de cana-de-açúcar com 50% de umidade, que são de 7.162 J.g⁻¹.

Os tratamentos 6 (espaçamento entre linhas de 0,70 m, armazenamento em camada de 0,50 m e estágio fenológico: maturação fisiológica) e 12 (espaçamento entre linhas de 0,70 m, armazenamento em camada de 0,20 m e estágio fenológico: maturação fenológica) se destacaram considerando a redução do teor de umidade da matéria-prima para a queima direta em caldeiras.

Agradecimentos

Empresa JF, pela parceria e apoio ao trabalho, com a cessão da forrageira JF 1600 AT; ao Banco Nacional Desenvolvimento - BNDES pelo apoio financeiro do Projeto e a Embrapa Milho e Sorgo pela infraestrutura e pessoal de apoio na condução e avaliação dos dados de campo.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11956**: coque: determinação do poder calorífico superior: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1990. 6 p.

BURIN, E. K.; BURANELLO, L.; LO GIUDICE, P.; VOGEL, T.; GÖRNER, K.; BAZZO, E. Boosting power output of a sugarcane bagasse cogeneration plant using parabolic trough collectors in a feedwater heating scheme. **Applied Energy**, v. 154, p. 232-241, 2015.

MANTOVANI, E. C.; MAY, A. Mecanização. In: PEREIRA FILHO, I. A.; RODRIGUES, J. A. S. (Ed.). **Sorgo**: o produtor pergunta, a Embrapa responde. Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 41-50. (Coleção 500 perguntas, 500 respostas).

SAMSON, R.; MANI, S.; BODDEY, R.; SOKHANSANJ, S.; QUESADA, D.; URQUIAGA, S.; REIS, V.; HO LEM, C. The potential of C4 perennial grasses for developing a global BIOHEAT industry. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 24, n. 5/6, p. 461-495, 2005.



Milho e Sorgo



MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO



PÁTRIA AMADA
BRASIL
GOVERNO FEDERAL